


#5  
6-7-00  
cd



MISSING THE  
TECHNICAL

Group Art Unit: 2786

**Examiner:** Unassigned

)

)
)
)
)

## CLAIM FOR CONVENTION PRIORITY

Washington, D.C. 20231

**Sir:**

The benefit of the filing date of the following prior foreign application in the following foreign country is hereby requested, and the right of priority provided in 35 U.S.C. § 119 is hereby claimed:


German Patent Application No. 199 10 098.5

**Filed: March 8, 1999**

In support of this claim, enclosed is a certified copy of said prior foreign application. Said prior foreign application is referred to in the oath or declaration. Acknowledgment of receipt of the certified copy is requested.

Respectfully submitted,

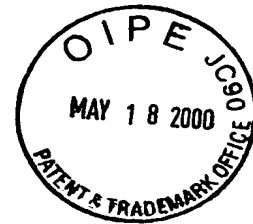
**BURNS, DOANE, SWECKER & MATHIS, L.L.P.**

By:   
Robert S. Swecker  
Registration No. 19,885

**P.O. Box 1404  
Alexandria, Virginia 22313-1404  
(703) 836-6620**



## Bescheinigung



Die Firma ABB Research Ltd in Zürich/Schweiz hat eine Patentanmeldung unter der Bezeichnung

"Verfahren zur Beurteilung der Zuverlässigkeit  
technischer Systeme"

am 8. März 1999 beim Deutschen Patent- und Markenamt eingereicht.

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

Die Anmeldung hat im Deutschen Patent- und Markenamt vorläufig das Symbol G 05 B 13/00 der Internationalen Patentklassifikation erhalten.

München, den 28. März 2000

**Deutsches Patent- und Markenamt**

**Der Präsident**

Im Auftrag

Aktenzeichen: 199 10 098.5

**Ebert**

## BESCHREIBUNG

Verfahren zur Beurteilung der Zuverlässigkeit technischer Systeme

## TECHNISCHES GEBIET

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Zuverlässigkeitsanalyse technischer Anlagen. Sie geht aus von einem Verfahren zur quantitativen Schätzung der Zuverlässigkeit eines technischen Systems nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

## STAND DER TECHNIK

Ein solches Verfahren ist aus dem Artikel von T. L. Regulinski und Y. P. Gupta, "Reliability Cost Estimation: Managerial Perspectives", IEEE Transactions on Reliability, Band R-32, S. 276-281 (1983) bekannt. Dort wird ein Verfahren zur Schätzung fehlerbedingter Kosten im Lebenszyklus eines Systems dargelegt. Für die Systemkomponenten werden je nach Fehlermechanismus verschiedene Ausfallwahrscheinlichkeitsverteilungen postuliert und deren Parameter statistisch oder durch subjektive Expertenmeinung geschätzt. Eine verbesserte Expertenschätzung wird dadurch erzielt, dass für die Ausfallrate ein oberer, mittlerer und unterer Schätzwert angegeben und zur Bestimmung einer Betaverteilung der Ausfallrate verwendet werden. Aus den solcherart modellierten Betaverteilungen wird für das Gesamtsystem eine eindeutige Kostenschätzung berechnet. Problematisch ist jedoch, dass subjektive Schätzungen durch einen oder wenige Experten zu Korrelationen zwischen verschiedenen Ausfallraten führen und die Vorhersage für die Systemzuverlässigkeit auf unbekannte Weise systematisch verfälschen können.

Darüberhinaus ist es bekannt, dass für Fehlerarten mit konstanter Fehlerrate die Fehlerhäufigkeit, d. h. die Zufälligkeit der Anzahl Fehler in einem Zeitintervall, durch eine Poissonverteilung beschrieben werden kann (s. z. B. das Lehrbuch von A. Birolini, "Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme", Springer-Verlag Berlin (1991), S. 366).

Ferner sind Zuverlässigkeitsanalysen in tabellarischer Form unter den Begriffen FMEA-Analyse ("Failure/Fault Modes and Effects Analysis") oder FMECA ("Failure/Fault Modes, Effects and Criticality Analysis") Stand der Technik. Die Systemkomponenten werden mit ihren möglichen Ausfallarten und den berechneten oder geschätzten Ausfallraten zeilenweise aufgelistet und die Störanfälligkeit des Gesamtsystems beurteilt.

#### **DARSTELLUNG DER ERFINDUNG**

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein verbessertes Verfahren zur Abschätzung der Zuverlässigkeit eines technischen Systems anzugeben. Diese Aufgabe wird erfindungsgemäss durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Die Erfindung besteht darin, dass für die Komponenten eines technischen Systems erste Fehlerarten mit statistisch bekannten Fehlerraten und zweite Fehlerarten mit weitgehend unbekannten Fehlerraten unterschieden werden, wobei für letztere jeweils ein oberer und ein unterer subjektiver Schätzwert angegeben wird und mit allen oberen Schätzwerten eine erste Grenzwahrscheinlichkeitsverteilung und mit allen unteren Schätzwerten eine zweite Grenzwahrscheinlichkeitsverteilung für die Systemzuverlässigkeit berechnet werden. Es wird also eine ungefähre Kenntnis sowohl der Fehlerraten als auch der Unsicherheit von Fehleratenschätzungen zur Angabe einer konservativen oberen und unteren Grenze der Systemzuverlässigkeit genutzt.

Mit dem erfindungsgemässen Verfahren wird der Einfluss systematischer Fehler auf die Berechnung der Systemzuverlässigkeit weitgehend zurückgedrängt, indem die Expertenschätzungen als untereinander korreliert behandelt werden.

In einem ersten Ausführungsbeispiel werden für die zweiten Fehlerraten zusätzlich jeweils ein mittlerer Wert geschätzt und zur Berechnung einer mittleren Wahrscheinlichkeitsverteilung herangezogen. Durch Addition der einzelnen Ausfallwahrscheinlichkeiten bzw. durch Faltung ihrer Verteilungen kann eine grafische Darstellung der mittleren, maximalen und minimalen Systemzuverlässigkeit für einen Prognosezeitraum angegeben werden. Die grafische Darstellung ermöglicht eine einfache, intuitive Risikobeurteilung für die Wahrscheinlichkeit eines Systemausfalls oder einer Kostenüberschreitung wegen Wartung, Stillstand und Reparatur eines technischen Systems.

In einem weiteren Ausführungsbeispiel werden für jede erste Fehlerart eine Poissonverteilung angenommen, für ein gefordertes Konfidenzniveau eine nach oben und unten verschobene Grenz-Poissonverteilung bestimmt und durch gewichtete Summierung der drei Poissonverteilungen eine verbreiterte Poissonverteilung der ersten Fehlerart bestimmt.

Weitere Ausführungen, Vorteile und Anwendungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen sowie aus der nun folgenden Beschreibung anhand der Figuren.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

Es zeigen beispielhaft:

Fig. 1 eine erfindungsgemässe Darstellung für die prognostizierte Wahrscheinlichkeit  $W$  einer Stillstandszeit kleiner oder gleich  $T_{\text{down}}$  (in Stunden) während eines Jahres; und

Fig. 2 eine schematische Darstellung der erfindungsgemässen Berechnung der Systemzuverlässigkeit im Zusammenhang mit einer FMEA-Tabelle.

In den Figuren sind gleiche Teile mit gleichen Bezugszeichen versehen.

#### WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

Die Erfindung hat ein Verfahren zur quantitativen Schätzung der Zuverlässigkeit eines technischen Systems zum Gegenstand. Unter System ist generell eine beliebige Maschine oder Anlage, z. B. eine Turbine oder ein Kraftwerk, oder ein Herstellungs- oder Bearbeitungsprozess zu verstehen. Dabei werden für die Systemkomponenten Fehlerarten mit zugehörigen Fehlerraten angegeben und für das Gesamtsystem und ein vorgebbares Zeitintervall eine Wahrscheinlichkeitsverteilung einer die Zuverlässigkeit charakterisierenden Zufallsgrösse bestimmt. Erste Fehlerraten werden durch statistische Stichproben bestimmt. Zweite Fehlerraten werden durch subjektive Expertenmeinung geschätzt, wobei jeweils ein oberer und ein unterer Schätzwert angegeben werden. Erfindungsgemäss werden mit den oberen Schätzwerten eine erste Grenzwahrscheinlichkeitsverteilung und mit den unteren Schätzwerten eine zweite Grenzwahrscheinlichkeitsverteilung berechnet. Im folgenden werden bevorzugte Ausführungsbeispiele angegeben.

Für die zweiten Fehlerraten können zusätzlich jeweils ein mittlerer Wert geschätzt und mit den mittleren Werten eine mittlere Wahrscheinlichkeitsverteilung berechnet werden. Bevorzugt werden als mittlere Werte die mutmasslich wahrscheinlichsten Werte geschätzt. Das Ergebnis kann in Form einer grafischen Darstellung gemäss Fig. 1 zusammengefasst und veranschaulicht werden. Dort sind als Zufallsgrösse eine ausfallbedingte Stillstandszeit  $T_{\text{down}}$  während eines Jahres in Stunden gewählt und drei Wahrscheinlichkeitsverteilungen  $W(T_{\text{down}})$  1, 2, 3 dafür angegeben, dass die aus-

fallbedingte Stillstandszeit kleiner oder gleich  $T_{\text{down}}$  ist. Dabei bezeichnen 2 eine erste oder optimistische und 3 eine zweite oder pessimistische Grenzwahrscheinlichkeitsverteilung und 1 eine mittlere Wahrscheinlichkeitsverteilung.

Für die ersten Fehlerraten sollen Stichproben-Mittelwerte bestimmt und Verteilungsfunktionen angenommen werden und aus der Ungewissheit jedes Stichproben-Mittelwerts eine Breite oder eine Verbreiterung der zugehörigen Verteilungsfunktion bestimmt werden. Insbesondere werden für jede erste Fehlerart eine Poissonverteilung mit einem nominellen Erwartungswert gleich dem Stichproben-Mittelwert angenommen, aus einem geforderten Konfidenzniveau ein minimaler und ein maximaler Erwartungswert berechnet, und durch gewichtete Summierung der Poissonverteilungen mit dem nominellen, minimalen und maximalen Erwartungswert eine verbreiterte Poissonverteilung berechnet. Erfindungsgemäss werden ein Konfidenzniveau  $1-\alpha$  und Gewichtungsfaktoren  $1-2\alpha$ ,  $\alpha$  und  $\alpha$  für die Poissonverteilungen mit dem nominellen, minimalen und maximalen Erwartungswert gewählt. Typischerweise wird  $\alpha$  im Bereich zwischen 0,05 und 0,3 und insbesondere  $\alpha=0,1$  gewählt.

Das erfindungsgemässe Modell einer verbreiterten Wahrscheinlichkeitsverteilung dient dazu, die Ungewissheit in der Kenntnis des Erwartungswerts der zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung durch eine Verbreiterung der Wahrscheinlichkeitsverteilung angemessen zu berücksichtigen. Im folgenden wird ein Berechnungsbeispiel für eine Poissonverteilung angegeben. Es sei aus Betriebserfahrung o. ä. bekannt, dass eine Systemkomponente insgesamt  $n_{\text{stat}}$  Ausfälle während einer Beobachtungszeit  $t_{\text{stat}}$  hat. Dann ist ein nomineller Erwartungswert der zugrundegelegten Poissonverteilung durch  $\mu_{\text{nom}} = n_{\text{stat}}/t_{\text{stat}} * T$  gegeben, wobei  $T$  = Zeitintervall für die Risikoanalyse bzw. Betriebsdauer des Gesamtsystems. Man berechnet anhand eines Konfidenzniveaus, z. B.  $1-\alpha=0,9$ , eine untere und obere Grenze eines Konfidenzintervalls für den Erwartungswert mit folgenden

Gleichungen (gemäss Koslow und Uschakow, Handbuch zur Berechnung der Zuverlässigkeit für Ingenieure, S. 426 (1979)):

$$\mu_{low} = n_{low} / t_{stat} * T, \quad \mu_{up} = n_{up} / t_{stat} * T \quad \text{mit}$$

$$n_{low} = 0,5 * \chi^2_{[\alpha/2]}(2n_{stat}) \quad \text{und} \quad n_{up} = 0,5 * \chi^2_{[1-\alpha/2]}(2n_{stat}+2),$$

wobei  $\chi^2_{[...]}$ (...) die (tabellierten)  $\chi^2$ -Quantile bezeichnen. Die Faktoren 2 und 0,5 sind in Abweichung von einer gewöhnlichen  $\chi^2$ -Verteilung durch die Poissonverteilung bedingt. Die Poissonverteilungen mit den Erwartungswerten  $\mu_{low}$ ,  $\mu_{nom}$  und  $\mu_{up}$  werden mit den Gewichtungsfaktoren 0,1; 0,8 und 0,1 addiert, so dass eine Verbreiterung resultiert. Erfindungsgemäss sind die Gewichtungsfaktoren für die beiden randseitigen Poissonverteilungen so gewählt, dass die Summe der aus dem Konfidenzintervall nach oben und unten überstehenden Anteile (jeweils ca. die Hälfte der randseitigen Verteilungen) gerade gleich dem Konfidenzniveau selber sind. Dadurch ist die Berechnung der Poisson-Verbreiterung weitgehend selbstkonsistent.

Für ein höheres Konfidenzniveau verbreitert sich das Konfidenzintervall, die Gewichtungsfaktoren für die Randverteilungen nehmen ab und die Verbreiterung fällt geringer aus. Falls das Zeitintervall T für die Risikoanalyse deutlich länger als die Beobachtungszeit  $t_{stat}$  ist, werden in der verbreiterten Poissonverteilung drei separate Maxima auftreten. Es ist jedoch wünschenswert, eine monomodale verbreiterte Poissonverteilung zu erhalten. Hierfür können die randseitigen Gewichtungsfaktoren grösser oder kleiner gewählt und/oder die Anzahl der zu gewichtenden Poissonverteilungen vergrössert werden.

Zur Verbesserung der Prognose der Systemzuverlässigkeit oder der Systemrisikoanalyse werden ferner dritte Fehlerarten berücksichtigt, deren Fehlerraten a priori oder mit grosser statistischer Sicherheit bekannt sind und für die eine ideale Poissonverteilung angenommen wird. Die Verteilungsfunktionen der ersten und dritten Fehlerraten werden gefaltet und durch Addition der oberen, unteren und gegebenenfalls mittleren Schätzwerte der zweiten Fehlerraten



die erste und zweite Grenzwahrscheinlichkeitsverteilung 2, 3 und gegebenenfalls eine mittlere Wahrscheinlichkeitsverteilung 1 berechnet. Zusätzlich können andere für die Systemzuverlässigkeit relevante, nicht zufällige Grössen für das Zeitintervall bestimmt und zu den Wahrscheinlichkeitsverteilungen addiert werden.

Bei der Zufallsgrösse, welche die Systemzuverlässigkeit charakterisiert, kann es sich um eine Fehleranfälligkeit, eine Stillstandszeit, Kosten für Stillstand, Reparatur und Wartung oder daraus abgeleitete Grössen handeln. Typischerweise sind die Fehlerraten Ausfallraten der Systemkomponenten.

Schliesslich wird eine Anwendung des offenbarten Verfahrens im Zusammenhang mit FMEA("Failure/Fault Modes and Effects Analysis")-Tabellen, FMECA("Failure/Fault Modes, Effects and Criticality Analysis")-Tabellen oder daraus abgeleiteten Tabellen erläutert. Erfindungsgemäss werden in den Tabellen erste, zweite und dritte Fehlerraten unterschieden, für erste Fehlerraten Stichproben-Mittelwerte und Konfidenzintervalle angegeben, für zweite Fehlerraten obere, untere und gegebenenfalls mittlere Schätzwerte angegeben und für dritte Fehlerraten Erwartungswerte angegeben. Insbesondere werden Poissonverteilungen der ersten und dritten Fehlerarten berechnet und miteinander gefaltet und werden die zweiten Fehlerraten in obere, untere und gegebenenfalls mittlere Fehlerraten gruppiert und jeweils separat addiert.

Das Verfahren ist für erste Fehlerarten in Fig. 2 veranschaulicht. Für jede Zeile der FMEA- oder FMECA-Tabelle 4 mit einer ersten Fehlerart werden verbreiterte Poissonverteilungen  $w_i$  berechnet 5, diese zu einer Gesamtwahrscheinlichkeitsdichteverteilung  $w$  gefaltet 6 und durch Integration eine Gesamt-Wahrscheinlichkeitsverteilung  $W$  bestimmt 7. Es kann auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung 1-W angegeben werden, dass die Zufallsgrösse, z. B. die ausfallbedingte Stillstandszeit im vorgebbaren Zeitinter-

vall, grösser als  $T_{\text{down}}$  ist. Für jede Gruppe der zweiten Fehlerarten wird dieses Berechnungsverfahren wiederholt, um eine obere, untere und gegebenenfalls mittlere Gesamtwahrscheinlichkeitsverteilung  $W$  oder  $1-W$  für das Systemausfallrisiko zu erhalten.

#### BEZUGSZEICHENLISTE

$T_{\text{down}}$	ausfallbedingte Stillstandszeit
$W(T_{\text{down}})$	Wahrscheinlichkeitsverteilung für eine ausfallbedingte Stillstandszeit $\leq T_{\text{down}}$
1	mittlere Wahrscheinlichkeitsverteilung
2	optimistische Wahrscheinlichkeitsverteilung
3	pessimistische Wahrscheinlichkeitsverteilung
4	FMEA-Tabelle, FMECA-Tabelle
5	zeilenweise berechnete Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen $w_i$ ; verbreiterte Poissonverteilungen
6	Gesamt-Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung $w$ ; Faltung von (verbeiterten) Poissonverteilungen
7	Gesamt-Wahrscheinlichkeitsverteilung $W$ .

## PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zur quantitativen Schätzung der Zuverlässigkeit eines technischen Systems, wobei für die Systemkomponenten Fehlerarten mit zugehörigen Fehlerraten angegeben werden und für das Gesamtsystem und für ein vorgebbares Zeitintervall eine Wahrscheinlichkeitsverteilung einer die Zuverlässigkeit charakterisierenden Zufallsgrösse bestimmt wird, wobei erste Fehlerraten durch statistische Stichproben bestimmt werden, wobei ferner zweite Fehlerraten durch subjektive Expertenmeinung geschätzt werden und jeweils ein oberer und ein unterer Schätzwert angegeben werden, dadurch gekennzeichnet, dass mit den oberen Schätzwerten eine erste Grenzwahrscheinlichkeitsverteilung (2) und mit den unteren Schätzwerten eine zweite Grenzwahrscheinlichkeitsverteilung (3) berechnet werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass
  - a) für die zweiten Fehlerraten zusätzlich jeweils ein mittlerer, insbesondere ein wahrscheinlichster Wert geschätzt wird und
  - b) mit den mittleren Werten eine mittlere Wahrscheinlichkeitsverteilung (1) berechnet wird.
3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-2, dadurch gekennzeichnet, dass
  - a) für erste Fehlerraten Stichproben-Mittelwerte bestimmt und Verteilungsfunktionen angenommen werden und
  - b) aus der Ungewissheit jedes Stichproben-Mittelwerts eine Breite oder eine Verbreiterung der zugehörigen Verteilungsfunktion bestimmt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass
  - a) für jede erste Fehlerart eine Poissonverteilung mit einem nominellen Erwartungswert gleich dem Stichproben-Mittelwert angenommen wird,
  - b) aus einem geforderten Konfidenzniveau ein minimaler und ein maximaler Erwartungswert berechnet werden, und
  - c) durch gewichtete Summierung der Poissonverteilungen mit dem nominellen, minimalen und maximalen Erwartungswert eine verbreiterte Poissonverteilung berechnet wird.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass
  - a) ein Konfidenzniveau  $1-\alpha$  und Gewichtungsfaktoren  $1-2\alpha$ ,  $\alpha$  und  $\alpha$  für die Poissonverteilungen mit dem nominellen, minimalen und maximalen Erwartungswert gewählt werden und
  - b) insbesondere  $\alpha=0,1$  gesetzt wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-5, dadurch gekennzeichnet, dass dritte Fehlerarten berücksichtigt werden, deren Fehlerraten a priori oder mit grosser statistischer Sicherheit bekannt sind und für die eine Poissonverteilung angenommen wird.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-6, dadurch gekennzeichnet, dass
  - a) Verteilungsfunktionen der ersten und von dritten Fehlerraten gefaltet werden und durch Addition der oberen, unteren und gegebenenfalls mittleren Schätzwerte der zweiten Fehlerraten die erste und zweite Grenzwahrscheinlichkeitsverteilung (2, 3) und gegebenenfalls eine mittlere Wahrscheinlichkeitsverteilung (1) berechnet werden und

- b) insbesondere andere für die Systemzuverlässigkeit relevante, nicht zufällige Grössen für das Zeitintervall bestimmt und zu den Wahrscheinlichkeitsverteilungen addiert werden.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1-7, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) die die Zuverlässigkeit charakterisierende Zufallsgrösse eine Fehleranfälligkeit, eine Stillstandszeit, Kosten für Stillstand, Reparatur und Wartung oder daraus abgeleitete Grössen sind und
  - b) insbesondere die Fehlerraten Ausfallraten sind.
9. Anwendung des Verfahrens gemäss eines der Ansprüche 1-8 im Zusammenhang mit FMEA-Tabellen, FMECA-Tabellen oder daraus abgeleiteten Tabellen (4), dadurch gekennzeichnet, dass
- a) in den Tabellen (4) erste, zweite und dritte Fehlerraten unterschieden werden,
  - b) für erste Fehlerraten Stichproben-Mittelwerte und Konfidenzintervalle angegeben werden,
  - c) für zweite Fehlerraten obere, untere und gegebenenfalls mittlere Schätzwerte angegeben werden und
  - d) für dritte Fehlerraten Erwartungswerte angegeben werden.
10. Anwendung des Verfahrens nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass
- a) Poissonverteilungen der ersten und dritten Fehlerarten berechnet und miteinander gefaltet werden und
  - b) die zweiten Fehlerraten in obere, untere und gegebenenfalls mittlere Fehlerraten gruppiert und jeweils separat addiert werden.

## ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur quantitativen Schätzung der Zuverlässigkeit eines technischen Systems, das besonders für komplexe Systeme mit einer Vielzahl von Komponenten von Nutzen ist. Für die Systemkomponenten werden erste, zweite und dritte Ausfallraten unterschieden. Erfindungsgemäss werden für die weitgehend unbekannten zweiten Ausfallraten jeweils ein oberer, unterer und gegebenenfalls mittlerer Wert durch subjektive Expertenmeinung geschätzt und alle oberen, unteren und gegebenenfalls mittleren Schätzwert getrennt zur Berechnung einer optimistischen und pessimistischen Grenzwahrscheinlichkeitsverteilung (2, 3) und gegebenenfalls einer mittleren Wahrscheinlichkeitsverteilung (1) der Systemzuverlässigkeit verwendet. Dadurch werden systematische Korrelationen zwischen Expertenschätzungen berücksichtigt. Für die ersten Ausfallraten werden aus Betriebserfahrung gewonnene Mittelwerte mit einem Konfidenzintervall bestimmt und verbreiterte Poissonverteilungen berechnet. Zur Gesamtwahrscheinlichkeit der Systemzuverlässigkeit können ferner die Poissonverteilungen von dritten Fehlerarten addiert werden, deren Ausfallraten a priori oder mit grosser statistischer Sicherheit bekannt sind. Das Verfahren ist besonders für die Verwendung im Zusammenhang mit FMEA("Failure/Fault Modes and Effects Analysis")-Tabellen (4) und FMECA("Failure/Fault Modes, Effects and Criticality Analysis")-Tabellen (4) geeignet.

(Fig. 1)

1 / 2

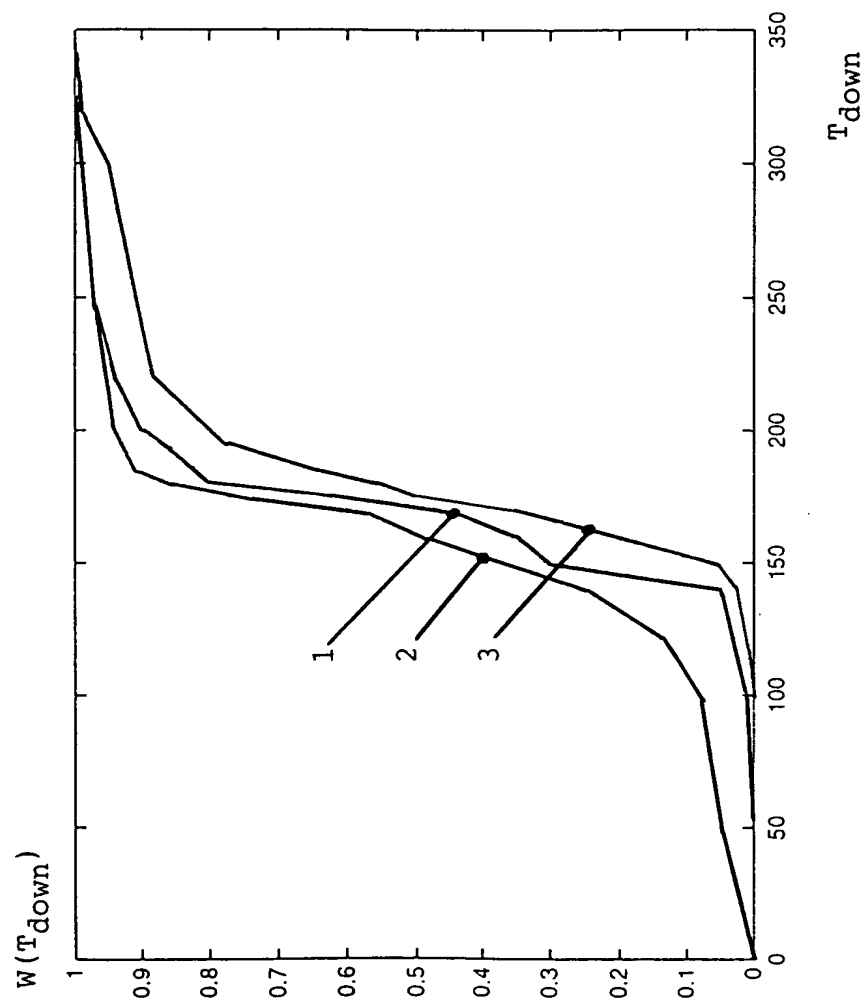


Fig. 1

2 / 2

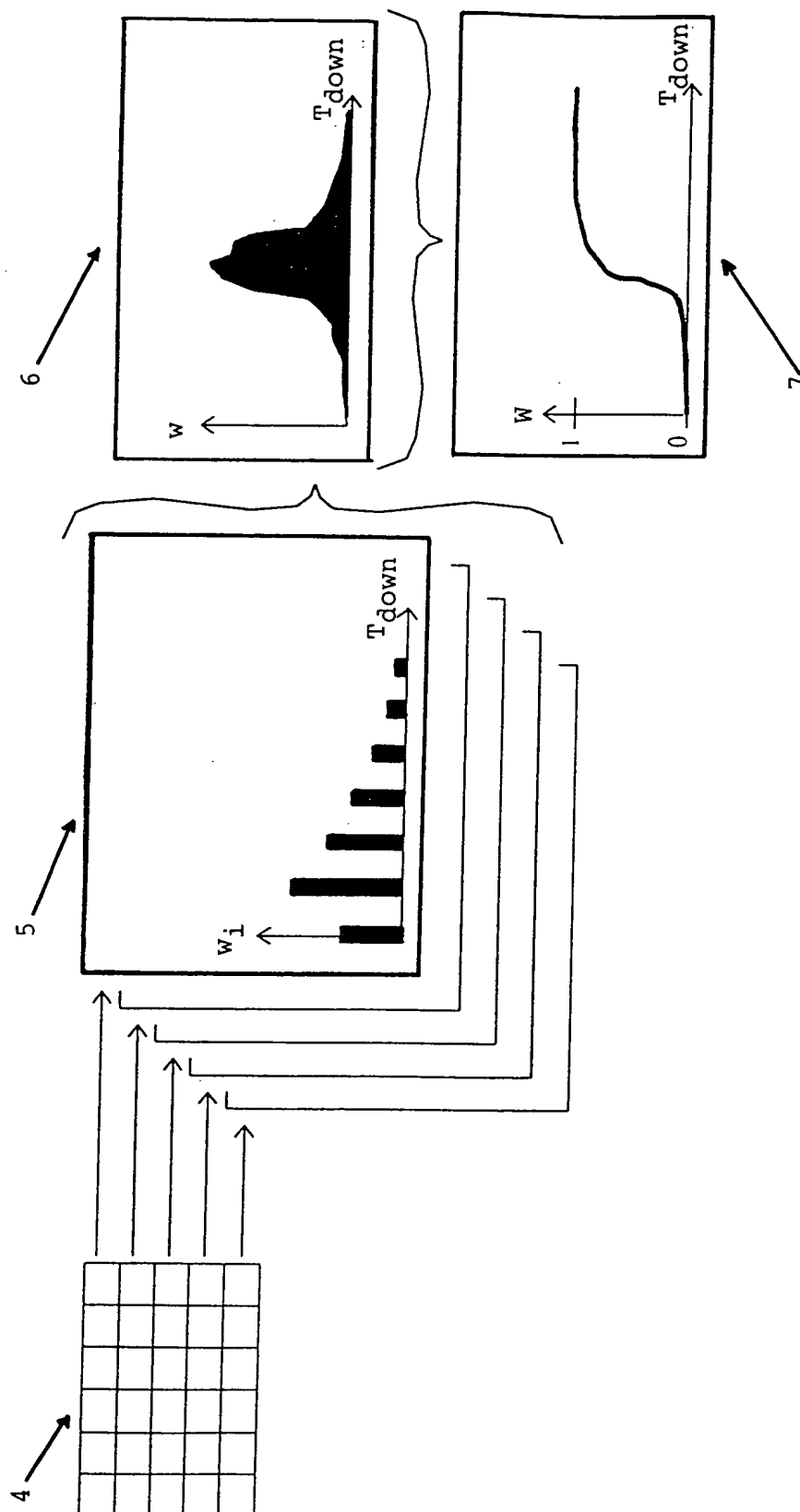


Fig. 2



## DESCRIPTION

Method for assessing the reliability of technical  
systems

5

The present invention relates to the field of reliability analysis of technical systems. It proceeds from a method for quantitative estimation of the reliability of a technical system according to the preamble of claim 1.

Such a method is known from the article by T. L. Regulinski and Y. P. Gupta, "Reliability Cost Estimation: Managerial Perspectives", IEEE Transactions on Reliability, Volume R-32, pages 276-281 (1983). A method is set forth there for estimating fault-induced costs in the life cycle of a system. Various failure probability distributions are postulated for the system components, depending on the fault mechanism, and their parameters are estimated statistically or by subjective expert opinion. An improved expert estimate is achieved by specifying an upper, mean and lower estimate for the failure rate and using them to determine a beta distribution of the failure rate. A unique cost estimate is calculated for the overall system from the beta distributions modeled in such a way. However, there is a problem that subjective estimates by one or a few experts lead to corrections between different failure rates, and the systematic falsification in an unknown way of the prediction of the system reliability.

Moreover, it is known that for types of fault with a constant fault rate the fault frequency, that is to say the randomness of the number of faults in a time interval, can be described by a Poisson distribution (see, for example, the textbook by A. Birolini, "Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme"

[Quality and Reliability of Technical Systems], Springer-Verlag Berlin (1991), page 366).

Furthermore, reliability analyses in tabular form under  
5 the terms of FMEA analysis ("Failure/Fault Modes and  
Effects Analysis") or FMECA ("Failure/Fault Modes,  
Effects and Criticality Analysis") constitute prior  
art. The system components are listed in rows with  
their possible types of failure and the calculated or  
10 estimated failure rates and the susceptibility to  
disruption of the overall system are assessed.

The object of the present invention is to specify an  
improved method for estimating the reliability of a  
15 technical system. This object is achieved according to  
the invention by means of the features of claim 1.

The invention consists in that first types of fault  
with statistically known fault rates and second types  
20 of fault with largely unknown fault rates are  
distinguished for the components of a technical system,  
an upper and a lower subjective estimate being  
specified respectively for the latter fault rates, and  
a first limiting probability distribution being  
25 calculated for the system reliability with all the  
upper estimates and a second limiting probability  
distribution being calculated for the system  
reliability with all the lower estimates. Thus,  
approximate knowledge both of the fault rates and of  
30 the uncertainty of fault rate estimates is used to  
specify a conservative upper and lower limit of the  
system reliability.

The method according to the invention largely cuts back  
35 the influence of systematic faults on the calculation  
of the system reliability by treating the expert  
estimates as being intercorrelated.

In a first exemplary embodiment, a mean value is respectively estimated in addition for the second fault rates and used to calculate a mean probability distribution. By adding the individual failure probabilities and by convoluting their distributions, it is possible to specify a graphical representation of the mean, maximum and minimum system reliability for a prediction period. The graphical representation permits a simple, intuitive risk assessment for the probability of a system failure or a cost overrun owing to maintenance, standstill and repair of a technical system.

In a further exemplary embodiment, a Poisson distribution is assumed for each first type of fault, an upwardly and downwardly displaced limiting Poisson distribution is determined for a required confidence level, and a widened Poisson distribution of the first type of fault is determined by weighted summing of the three Poisson distributions.

Further embodiments, advantages and applications of the invention follow from the dependent claims and from the description now following with the aid of the figures.

25

By way of example:

Figure 1 shows a representation according to the invention for the predicted probability  $W$  of a downtime of less than or equal to  $T_{\text{down}}$  (in hours) in the course of one year; and

30

Figure 2 shows a schematic representation of the calculation according to the invention of the system reliability in conjunction with an FMEA table.

35

Identical parts are provided with identical reference symbols in the figures.

The subject matter of the invention is a method for quantitative estimation of the reliability of a technical system. A system is understood to be in general terms an arbitrary machine or system, for example a turbine or a power plant, or a process for production or treatment. In this case, types of fault with associated fault rates are specified for the system components, and a probability distribution of a random variable characterizing the reliability is determined for the overall system and a prescribable time interval. First fault rates are determined by statistical random samples. Second fault rates are estimated by subjective expert opinion, an upper and a lower estimate being specified in each case. According to the invention, a first limiting probability distribution is calculated with the upper estimates, and a second limiting probability distribution is calculated with the lower estimates. Preferred exemplary embodiments are specified below.

For the second fault rates, it is additionally possible to estimate a mean value in each case and to calculate a mean probability distribution with the mean values. The values presumed to be the most probable are preferably estimated as mean values. The result can be summarized and illustrated in the form of a graphical representation in accordance with Figure 1. In the figure, a failure-induced downtime  $T_{\text{down}}$  during a year in hours is selected as random variable, and three probability distributions  $W(T_{\text{down}})$  1, 2, 3 are specified for the failure-induced downtime being less than or equal to  $T_{\text{down}}$ . In this case, 2 denotes a first or optimistic, and 3 a second or pessimistic, limiting probability distribution, and 1 denotes a mean probability distribution.

The aim for the first fault rates is to determine random sample mean values and assume distribution

functions, and to determine from the uncertainty of each random sample mean value a width or a widening of the associated distribution function. In particular, for each first type of fault, a Poisson distribution with a nominal expectation value equal to the random sample mean value is assumed, a minimum and a maximum expectation value are calculated from a required confidence level, and a widened Poisson distribution is calculated by weighted summing of the Poisson distributions with the nominal, minimum and maximum expectation values. According to the invention, a confidence level  $1-\alpha$  and weighting factors  $1-2\alpha$ ,  $\alpha$  and  $\alpha$  are selected for the Poisson distributions with the nominal, minimum and maximum expectation values.  $\alpha$  is typically selected in the range between 0.05 and 0.3, and in particular  $\alpha=0.1$ .

The model according to the invention of a widened probability distribution serves the purpose of taking appropriate account of the uncertainty in the knowledge of the expectation value of the fundamental probability distribution by widening the probability distribution. A computational example is specified below for a Poisson distribution. It may be assumed as known from operational experience or the like that a system component has a total of  $n_{\text{stat}}$  failures during one observation period  $t_{\text{stat}}$ . A nominal expectation value of the fundamental Poisson distribution is then given by  $\mu_{\text{nom}}=n_{\text{stat}}/t_{\text{stat}}*T$ , where  $T$ =time interval for the risk analysis or operating period of the overall system. Using a confidence level of, for example,  $1-\alpha=0.9$ , a lower and upper limit of a confidence interval is calculated for the expectation value using the following equations (after Koslow and Uschakow, Handbuch zur Berechnung der Zuverlässigkeit für Ingenieure, [Engineer's manual for calculating reliability], page 426 (1979)):  $\mu_{\text{low}}=n_{\text{low}}/t_{\text{stat}}*T$ ,  $\mu_{\text{up}}=n_{\text{up}}/t_{\text{stat}}*T$ , where  $n_{\text{low}}=0.5*\chi^2[\alpha/2](2n_{\text{stat}})$  and

$n_{up}=0.5*\chi^2[1-\alpha/2](2n_{stat}+2)$ , where  $\chi^2[...](...)$  denote the (tabulated)  $\chi^2$  quantiles. In a departure from a customary  $\chi^2$  distribution, the factors 2 and 0.5 are determined by the Poisson distribution. The Poisson distributions with the expectation values  $\mu_{low}, \mu_{nom}$  and  $\mu_{up}$  are added to the weighting factors 0.1; 0.8 and 0.1, thus resulting in widening. According to the invention, the weighting factors for the two edge Poisson distributions are selected such that the sum of the components projecting upwards and downwards from the confidence interval (in each case, approximately half of the edge distributions) are exactly equal to the confidence level itself. The calculation of the Poisson widening is thereby largely self-consistent.

For a higher confidence level, the confidence interval is widened, the weighting factors for the edge distributions decrease, and the widening is diminished. If the time interval  $T$  for the risk analysis is substantially longer than the observation time  $t_{stat}$ , three separate maxima occur in the widened Poisson distribution. However, it is desirable to obtain a monomodal widened Poisson distribution. The edge weighting factors can be selected to be larger or smaller for this purpose, and/or the number of the Poisson distributions to be weighted can be enlarged.

Furthermore, in order to improve the prediction of the system reliability or the system risk analysis, account is taken of third types of fault whose fault rates are known a priori or with high statistical reliability, and for which an ideal Poisson distribution is assumed. The distribution functions of the first and third fault rates are convoluted, and the first and second limiting probability distributions 2, 3 and, if appropriate, a mean probability distribution 1 are calculated by adding the upper, lower and, if appropriate, mean estimates of the second fault rates. In addition, other

non-random variables relevant to the system reliability can be determined for the time interval and added to the probability distributions.

- 5 The random variable which characterizes the system reliability can be a susceptibility to faults, downtime, costs of standstill, repair and maintenance, or variables derived therefrom. The fault rates are typically failure rates of the system components.

10

Finally, there is an explanation of an application of the disclosed method in conjunction with FMEA ("Failure/Fault Modes and Effects Analysis") tables, FMECA ("Failure/Fault Modes, Effects and Criticality Analysis") tables, or tables derived therefrom. According to the invention, first, second and third fault rates are distinguished in the tables, random sample mean values and confidence intervals are specified for first fault rates, upper, lower and, if appropriate, mean estimates are specified for second fault rates, and expectation values are specified for third fault rates. In particular, Poisson distributions of the first and third types of fault are calculated and convoluted with one another, and the second fault rates are grouped into upper, lower and, if appropriate, mean fault rates and added separately in each case.

20

25

The method is illustrated for the first types of fault in Figure 2. Widened Poisson distributions  $w_i$  are calculated 5 for each row of the FMEA or FMECA table 4 with a first type of fault and convoluted 6 to form an overall probability density distribution  $W$ , and an overall probability distribution  $W$  is determined 7 by integration. It is also possible to specify the probability distribution  $1-W$  such that the random variable, for example the failure-induced downtime in the prescribable time interval, is greater than  $T_{\text{down}}$ .

30

35

This computing method is repeated for each group of second types of fault in order to obtain an upper, lower and, if appropriate, mean overall probability distribution  $W$  or  $1-W$  for the system failure risk.



## LIST OF DESIGNATIONS

$T_{\text{down}}$	Failure-induced downtime
$W(T_{\text{down}})$	Probability distribution for a failure-induced downtime $\leq T_{\text{down}}$
1	Mean probability distribution
2	Optimistic probability distribution
3	Pessimistic probability distribution
4	FMEA table, FMECA table
5	Probability density distributions $w_i$ calculated by rows; widened Poisson distributions
6	Overall probability density distribution $w$ ; convolution of (widened) Poisson distributions
7	Overall probability distribution $W$

## PATENT CLAIMS

1. A method for quantitative estimation of the reliability of a technical system, types of fault with associated fault rates being specified for the system components, and a probability distribution of a random variable characterizing the reliability being determined for the overall system and for a prescribable time interval, first fault rates being determined by statistical random samples, and second fault rates furthermore being estimated by subjective expert opinion and an upper and a lower estimate being specified in each case, characterized in that a first limiting probability distribution (2) is calculated with the upper estimates, and a second limiting probability distribution (3) is calculated with the lower estimates.
2. The method as claimed in claim 1, characterized in that
  - a) a mean, in particular a most probable, value is additionally estimated in each case for the second fault rates, and
  - b) a mean probability distribution (1) is calculated with the mean values.
3. The method as claimed in one of claims 1-2, characterized in that
  - a) random sample mean values are determined for first fault rates and distribution functions are assumed, and
  - b) a width or a widening of the associated distribution function is determined from the uncertainty of each random sample mean value.
4. The method as claimed in claim 3, characterized in that

- U
- 5      a)    for each first type of fault, a Poisson distribution with a nominal expectation value equal to the random sample mean value is assumed,
- b)    a minimum and a maximum expectation value are calculated from a required confidence level, and
- 10     c)    a widened Poisson distribution is calculated by weighted summing of the Poisson distributions with the nominal, minimum and maximum expectation values.
5.    The method as claimed in claim 4, characterized in that
- 15     a)    a confidence level  $1-\alpha$  and weighting factors  $1-2\alpha$ ,  $\alpha$  and  $\alpha$  are selected for the Poisson distributions with the nominal, minimum and maximum expectation values, and
- b)    in particular,  $\alpha=0.1$  is set.
- 20     6.    The method as claimed in one of claims 1-5, characterized in that account is taken of third types of fault whose fault rates are known a priori or with high statistical reliability, and
- 25     for which a Poisson distribution is assumed.
7.    The method as claimed in one of claims 1-6, characterized in that
- 30     a)    distribution functions of the first and third fault rates are convoluted, and the first and second limiting probability distributions (2, 3) and, if appropriate, a mean probability distribution (1) are calculated by adding the upper, lower and, if appropriate, mean
- 35     estimates of the second fault rates, and
- b)    in particular, other non-random variables relevant to the system reliability are

determined for the time interval and added to the probability distributions.

- 5 8. The method as claimed in one of claims 1-7, characterized in that
  - 10 a) the random variable characterizing the reliability is a susceptibility to faults, a downtime, costs of standstill, repair and maintenance, or variables derived therefrom, and
  - b) in particular, the fault rates are failure rates.
- 15 9. The application of the method in accordance with one of claims 1-8 in conjunction with FMEA tables, FMECA tables or tables (4) derived therefrom, characterized in that
  - 20 a) first, second and third fault rates are distinguished in the tables (4),
  - b) random sample mean values and confidence intervals are specified for first fault rates,
  - 25 c) upper, lower and, if appropriate, mean estimates are specified for second fault rates, and
  - d) expectation values are specified for third fault rates.
- 30 10. The application of the method as claimed in claim 9, characterized in that
  - a) Poisson distributions of the first and third types of fault are calculated and convoluted with one another, and
  - 35 b) the second fault rates are grouped into upper, lower and, if appropriate, mean fault rates and added separately in each case.

**ABSTRACT**

The present invention relates to a method for quantitative estimation of the reliability of a technical system, which is useful, in particular, for complex systems with a multiplicity of components. First, second and third failure rates are distinguished for the system components. In accordance with the invention, an upper, lower and, if appropriate, mean value are in each case estimated for the largely unknown second failure rates by subjective expert opinion, and all upper, lower and, if appropriate, mean estimates are used separately to calculate an optimistic and pessimistic limiting probability distribution (2, 3) and, if appropriate, a mean probability distribution (1) of the system reliability. Systematic correlations between expert estimates are thereby taken into account. For the first failure rates, mean values obtained from operational experience are determined with a confidence interval, and widened Poisson distributions are calculated. Furthermore, it is possible to add to the overall probability of the system reliability the Poisson distributions of third types of fault whose failure rates are known a priori or with a high statistical reliability. The method is suitable, in particular, for use in connection with FMEA ("Failure/Fault Modes and Effects Analysis") tables (4) and FMECA ("Failure/Fault Modes, Effects and Criticality Analysis") tables (4).

(Figure 1)

1 / 2

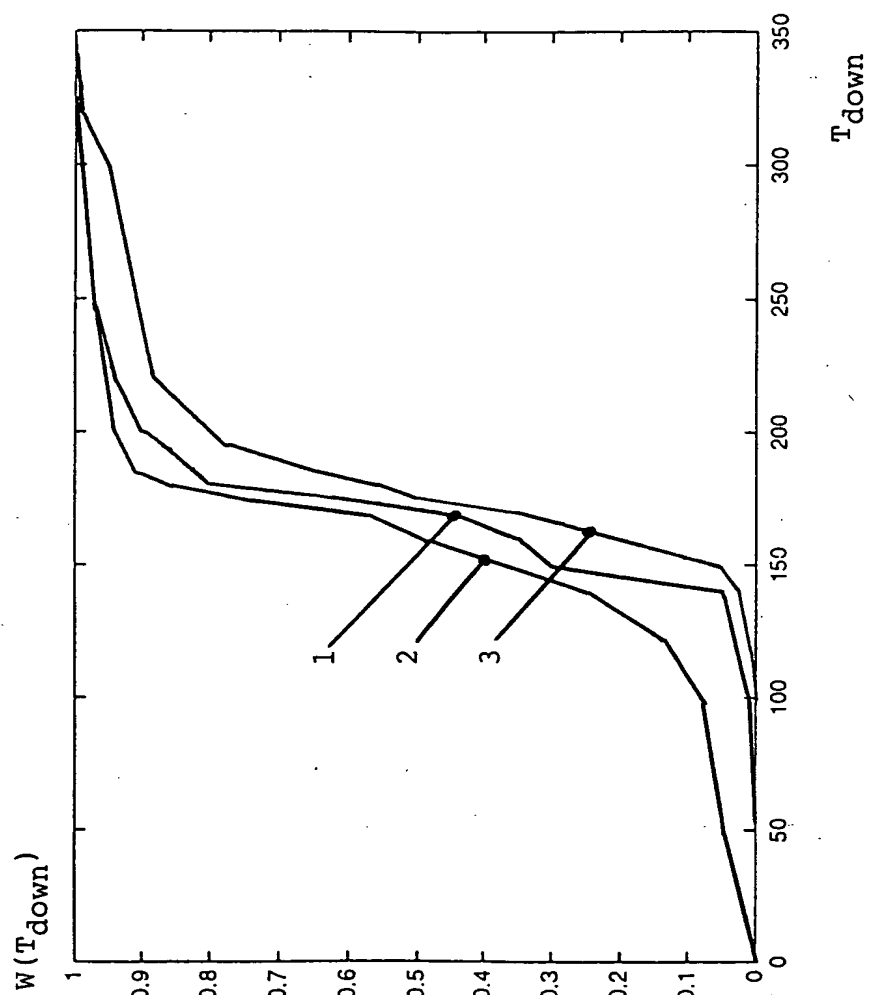


Fig. 1

2 / 2

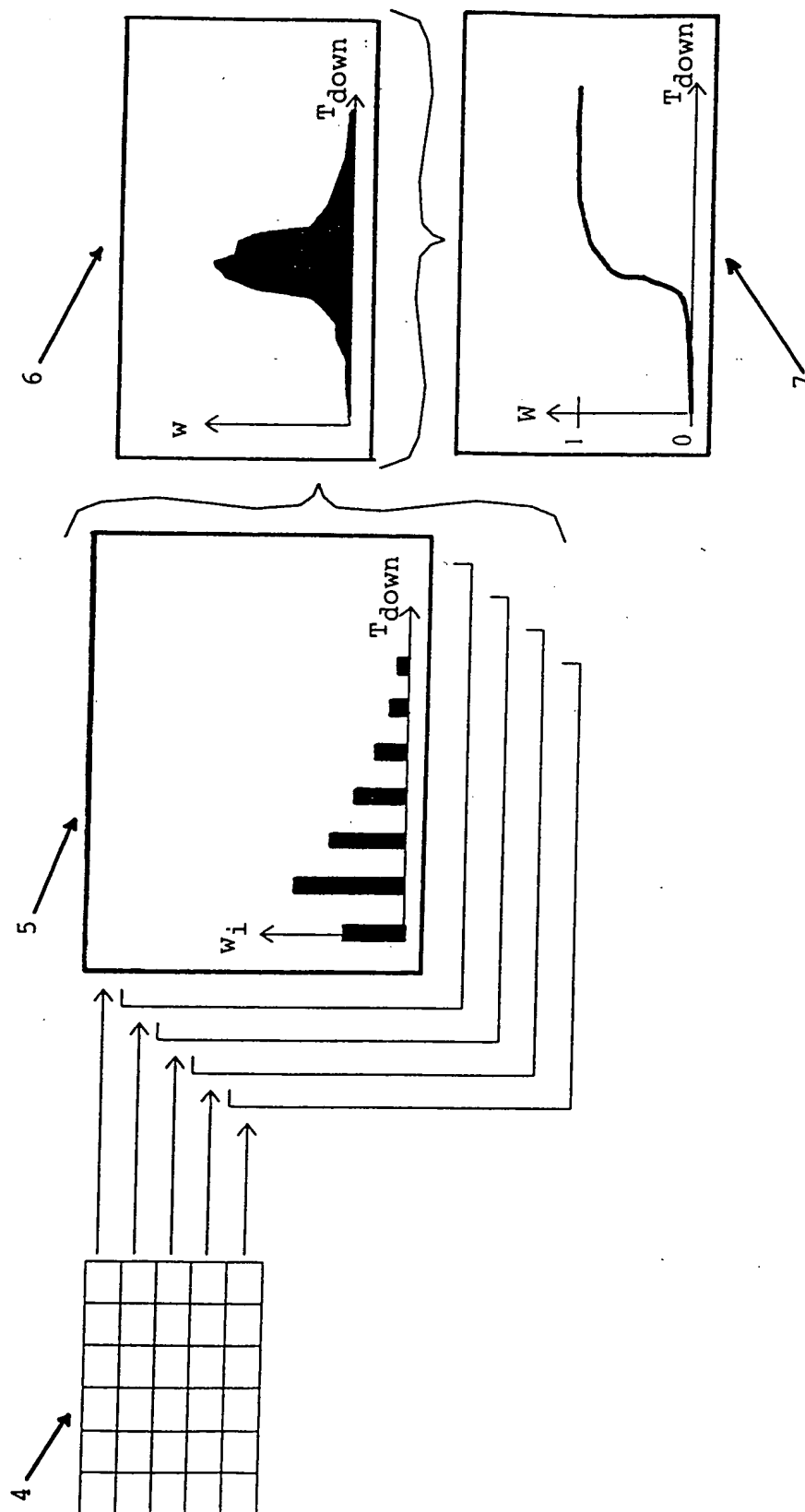


Fig. 2